Rev.Acad.Canar.Cienc., VII (Núms. 2,3 y 4), 25-43 (1995)

Presente y futuro de las técnicas robotizadas aplicadas al laboratorio químico: El robot de laboratorio como claro exponente de la automatización total de procesos (*)

PASTORA MARÍA TORRES VERDUGO
DOCTORA EN CIENCIAS QUÍMICAS
I.B. LUIS DE GÓNGORA
14071 - CÓRDOBA

Resumen

Se presenta una revisión actualizada de los principales aspectos relativos a la incorporación de la tecnologías robotizadas al laboratorio químico. Dicha incorporación se inscribe en la tendencia a la automatización de procesos existente desde hace más de dos décadas. El robot de laboratorio, que nace de forma independiente de sus parientes más cercanos, los robots industriales, permite la automatización de gran variedad de operaciones, inasequibles a otras técnicas automáticas, en sustitución del operador humano. Se incluye un resumen de las aplicaciones desarrolladas en los años 90, de las cuales se comentan los aspectos más sobresalientes. Se concluye con un apartado dedicado al análisis de las tendencias previsibles para un futuro.

Desde que el escritor checo Karel Capek (1) ideara la palabra "robot" para denominar un androide construido por un sabio en una de sus obras que era capaz de realizar el trabajo ejecutado por una persona, los robots y la Robótica - la Ciencia que se ocupa de ellos - se han introducido en numerosos ámbitos de nuestra actividad científica, tecnológica e incluso artística y literaria.

Podemos encontrar el primer antecedente de los robots en los tradicionales autómatas, conocidos en Europa desde la Antigüedad clásica, algunos de ellos verdaderos prodigios de la Micromecánica. Pero no es hasta la segunda mitad del siglo XX cuando encontramos los primeros robots como ingenios tecnológicos en los que convergen la Informática y la Automática. Fue la industria automobilística la pionera, con la incorporación de robots a las líneas de montaje para realizar tareas tales como la soldadura y la pintura. Los robots industriales derivaron de los primitivos telemanipuladores: brazos mecánicos dirigidos por un operador humano, destinados a efectuar un trabajo en ambientes adversos o peligrosos. Un robot industrial es, en esencia, un brazo

(*) Este trabajo obtuvo el Premio de la Academia Canaria de Ciencias (Concurso del año 1995) correspondiente a trabajos de investigación o de revisión de temas de interés científico sobre materias correspondientes al campo de la Química.

mecánico dotado de movimiento autónomo y de un ordenador programable para el control de dicho movimiento. Las dificultades tecnológicas, nada desdeñables, que conlleva esta integración han ido superándose paulatinamente, a medida que se han diseñado las sucesivas generaciones de robots. Así, a la primera generación, constituida por máquinas sin capacidad sensorial y mayoritaria en cuanto a su implantación en la industria, le ha seguido una segunda generación, de equipos dotados de "sentidos" (visión, tacto) y provistos de lenguajes de programación de alto nivel, aptos para acometer tareas más complejas. La tercera generación, aún en fase de desarrollo, tendrá incorporadas percepción multisensorial e inteligencia artificial, lo que le conferirá un elevado grado de autonomía (2).

Si bien la industria, sin duda alguna, es el ámbito de mayor implantación de los robots, la tecnología robotizada ha colonizado numerosos entornos, con aplicaciones muy dispares. Existen robots domésticos, robots médicos, equipos capaces de ejecutar una pieza musical sobre un teclado, robots esquiladores, robots y telemanipuladores para trabajar en las profundidades marinas y en el espacio exterior - dos de los medios más hostiles para la especie humana -, etc (3). El laboratorio químico, que ha vivido en los últimos treinta años una auténtica revolución instrumental encaminada a la automatización de procesos (4), es otro de los ámbitos en los que la Robótica ha irrumpido con fuerza.

En este trabajo se hará un recorrido por los principales tópicos relacionados con la robotización de los laboratorios químicos. Comenzaremos con un apartado dedicado a describir lo que se entiende por robot en este contexto. Seguidamente abordaremos los distintos tipos de robots de laboratorio que se pueden encontrar en el mercado. A continuación, nos centraremos en las aplicaciones de los robots y en los avances que se han producido en años recientes, para finalizar con una panorámica de las tendencias previsibles para un futuro próximo.

EL ROBOT DE LABORATORIO

La definición más general de un robot podría ser un ingenio electrónico capaz de ejecutar automáticamente operaciones o movimientos muy variados (2). Esta definición, al ser lo más general posible, resulta vaga en lo que se refiere a las características o naturaleza de tal "ingenio electrónico", si bien la función a que está destinado parece estar más clara.

El *Robot Institute of America* define un robot como un manipulador multifuncional reprogramable capaz de mover partes o herramientas a través de una secuencia de movimientos variables programados (5). En esta definición se hace más patente que el robot está diseñado para la manipulación automática, y que deberá incorporar algún mecanismo

informático que permita su reprogramación y control. Desde otro punto de vista, el robot puede considerarse como una extensión del ordenador que posibilita que éste realice trabajo físico, además de procesar los datos.

La *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) ha adoptado recientemente la definición de robot como una máquina manipulativa, controlada automáticamente, reprogramable y multifuncional con varios grados de libertad, ya sea fija en un lugar o móvil, que se usa en aplicaciones automáticas (6). En esta definición se enfatiza sobre todo el hecho de que el robot está controlado de forma automática, es decir, mediante un microprocesador o un ordenador. Además, se hace mención a los grados de libertad y a la posibilidad de movimiento como un todo, cuestiones importantes desde el punto de vista de la Ingeniería.

Un robot de laboratorio, por tanto, estará diseñado para la realización de una serie de manipulaciones y operaciones similares a las que lleva a cabo el analista. El empleo de un robot para desempeñar estas funciones **en sustitución** de un operador humano sólo está justificado, en el estado actual de la tecnología, cuando se trata de operaciones repetitivas y relativamente simples, de tal manera que podamos otorgar a la máquina un grado aceptable de confianza y hacer así rentable el proceso de automatización en su conjunto (7).

Este tipo de robots no requieren tanto de fuerza y rapidez como de precisión, también llamada repetibilidad (6) en el lenguaje de la Robótica. El robot deberá manejar materiales frágiles (recipientes y tubos de cristal, placas) o delicados (aparatos de medida). Todo ello hace que se haya de trabajar fundamentalmente su capacidad de manipulación, para asemejarla en lo posible a la de una mano humana, y esto sin perder simplicidad para no dificultar el necesario control. Conseguir este mimetismo operacional es uno de los principales objetivos, a la vez que uno de los mayores escollos, de la Robótica aplicada al laboratorio.

Por otro lado, si tenemos en mente lo que es un laboratorio químico, en el cual los aparatos e instrumentos de medida (balanzas, espectrofotómetros, cromatógrafos, etc) se distribuyen en sitios diferentes y fijos del mismo, añadiremos una dificultad extra a la puesta a punto de un robot de laboratorio: la necesidad de desplazamiento. Para subsanar este obstáculo de primer orden, nace el concepto de **estación robotizada** (8), que no es sino un pequeño laboratorio concentrado en el espacio, de modo que todos sus componentes operativos se hallen al alcance físico de un brazo robotizado. Así, la estación posee, por ejemplo, su propia balanza, convenientemente adaptada; también posee sus propios instrumentos de medida, así como los auxiliares necesarios para llevar a cabo la

secuencia de operaciones requerida para cada aplicación (Figura 1).

La estación robotizada consta, pues, de una serie de módulos, en los que se realizan las operaciones unitarias comunes en cualquier proceso químico. Estas operaciones unitarias se designan como LUOs (5)(iniciales de las palabras inglesas *Laboratory Unit Operation*), y cada una de ellas comprende una operación básica como pueden ser la pesada, la adición de disolventes o reactivos, la agitación o la centrifugación.

Cada proceso químico en particular podrá automatizarse combinando las LUOs necesarias, es decir, haciendo uso secuencial de los correspondientes módulos. La estación también incluye, por supuesto, un brazo mecánico, encargado de realizar el transporte entre los módulos integrantes. El control de todo el conjunto se ejerce desde un ordenador. Un lenguaje de programación apropiado nos permitirá, a su vez, la reprogramación para poner a punto cada nueva aplicación.

La estructura modular que acabamos de describir es una característica fundamental de las estaciones robotizadas. Esta estructura modular va en aras de una mayor flexibilidad y economía. En efecto, al disponer la estación de distintos módulos para la realización de las operaciones precisas, es posible reemplazar, añadir o suprimir alguno de estos módulos según requerimientos; con esto, una misma estación básica puede servir para desarrollar una

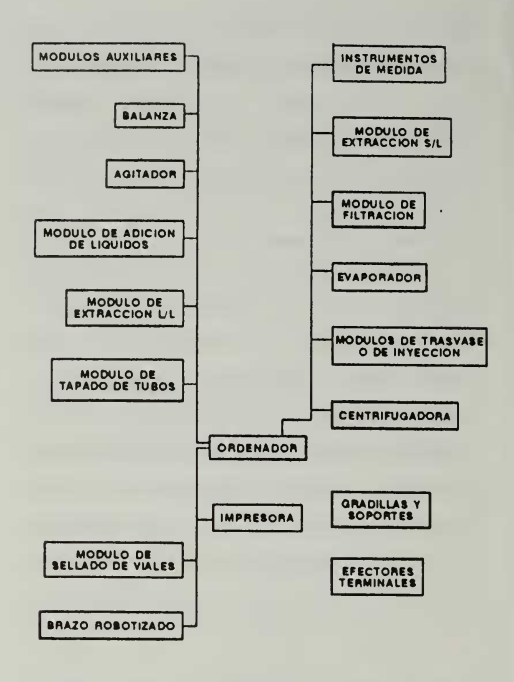


Figura 1. Resumen esquemático de los posibles componentes de una estación robotizada modular. Las lineas de unión indican las principales conexiones entre ellos.

infinidad de metodologías químicas, sin más que efectuar las oportunas modificaciones sobre ella. Naturalmente, el procedimiento no es tan inmediato, puesto que también es necesario modificar la parte informática para poder ejercer el control de la "nueva" estación así obtenida.

Las ventajas del diseño modular (9) son también patentes desde el punto de vista económico. Desde la irrupción de la tecnología robotizada en el laboratorio, las nuevas técnicas han tropezado con una barrera en muchos casos insalvable: el alto coste. Se trata de una tecnología muy cara, y ello es

debido, principalmente, a la complejidad de la instrumentación y a la escasez de la demanda. Por tanto, si se dispone de un diseño modular, la puesta a punto de una nueva aplicación es mucho menos costosa, pues, por lo general, sólo requerirá una inversión menor para la adquisición de uno o varios módulos más.

No obstante, a pesar de las citadas ventajas de la estructura modular, también se comercializan, como veremos, equipos que carecen de estas prestaciones. En este sentido, se puede distinguir (10) entre instrumentación **flexible**, que designa el tipo de estaciones de que hemos hablado, e instrumentación **dedicada**, para operar de una manera específica y preestablecida, y que, en consecuencia, no puede ser reprogramada. Volveremos sobre este tópico en posteriores apartados.

TIPOS BASICOS DE ROBOTS COMERCIALES

Los primeros robots de laboratorio comerciales se presentaron en la Conferencia de Pittsburgh celebrada en 1982. Estos prototipos fueron desarrollados de forma totalmente independiente de los robots industriales, que ya funcionaban con éxito en las cadenas de montaje, y se orientaron netamente hacia el proceso químico, dejando más de lado el desarrollo del *hardware*. Trece años después, el uso de robots se ha extendido notablemente en los laboratorios, especialmente en Estados Unidos, país pionero en este tipo de instrumentación.

Es posible clasificar los robots comerciales desde varios puntos de vista: atendiendo a sus geometrías, a sus mecanismos de funcionamiento, al número de sus articulaciones y/o grados de libertad, etc. Nos vamos a centrar en el aspecto geométrico, por ser el que más afecta al entorno del laboratorio.

Son tres las geometrías básicas que vamos a encontrar en el mercado: antropomórfica, cartesiana y cilíndrica (11). Los robots antropomórficos son los parientes más próximos de los robots industriales. Se caracterizan por poseer un brazo multiarticulado (Figura 2.a), generalmente montado sobre un raíl lineal, aunque también puede ir acoplado sobre un soporte fijo o giratorio. A este tipo pertenecen el *Optimized Robot for Chemical Analysis* (ORCA) de Hewlett-Packard, el Mitsubishi RM501, la serie Hudson y la serie CRS. Esta geometría tiene la ventaja de proporcionar un mayor número de grados de libertad, si bien resulta más difícil predecir la trayectoria del robot en cada momento, lo que requiere de algoritmos de control más complejos.

La geometría cartesiana se caracteriza por poseer movimiento a lo largo de los tres ejes cartesianos (Figura 2.b). De este tipo es el UMI Labman 1200. Tienen la ventaja de ser bastante compatibles con el entorno del laboratorio, frente al inconveniente de que el movimiento lineal limita la capacidad de acceso físico y, por

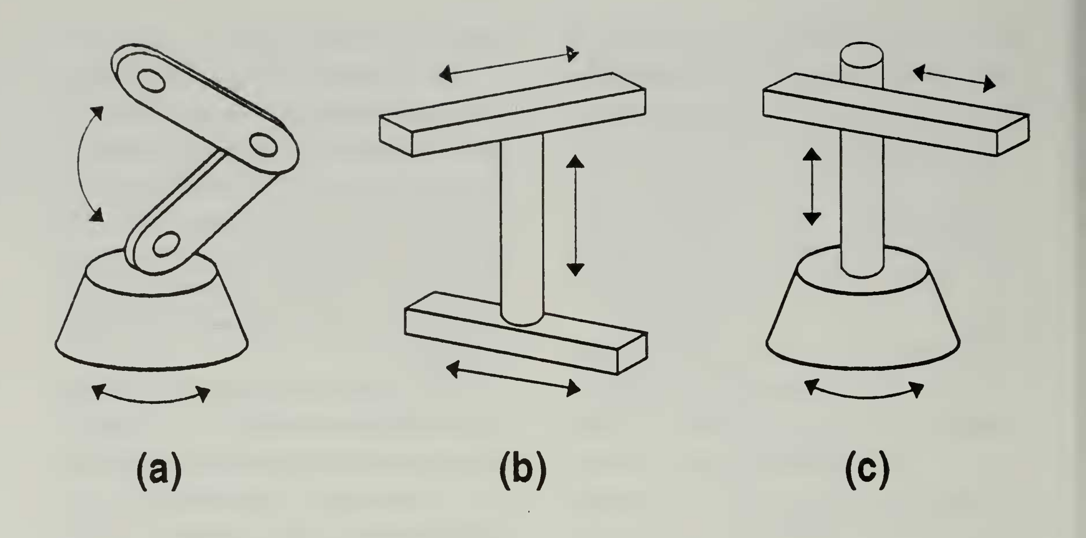


Figura 2. Representación de los tres tipos básicos de geometría para un robot de laboratorio: (a) antropomórfica, (b) cartesiana y (c) cilíndrica.

tanto, la operatividad; esto hace que sean escasas sus aplicaciones.

La geometría cilíndrica (Figura 2.c) se caracteriza por la posibilidad de movimientos que se pueden describir mediante coordenadas cilíndricas (altura, alcance y ángulo de giro). De este tipo son los robots comercializados por Zymark (*Zymate*). Su ventaja fundamental es la simplicidad geométrica sin perder capacidad de acceso, aunque son equipos que ocupan mucho espacio.

De la instrumentación descrita, la más utilizada a nivel mundial son los robots de Zymark. Esta firma comercializa tanto estaciones robotizadas (robots *Zymate*) como unidades más compactas (*Benchmate*), intermedias entre la instrumentación flexible y la dedicada. Concretamente, son los *Zymate* los que gozan de un mayor grado de aceptación, hecho este que podemos atribuir a algunas de sus características (8): su arquitectura modular (*PyTechnology*), las manos intercambiables y su lenguaje de programación (*EasyLab*), que es abierto y se estructura de forma jerarquizada a partir de posiciones del robot. En cuanto al *Benchmate*, se trata de un brazo integrado en un banco compacto, sobre el cual se hallan los componentes necesarios para llevar a cabo unas ciertas aplicaciones; el equipo es programable, pero carece de estructura modular, por lo cual su versatilidad es limitada.

APLICACIONES DE LOS ROBOTS EN EL LABORATORIO QUIMICO

La implantación de las tecnologías automáticas en general, y de las tecnologías robotizadas en particular, ha ido creciendo paulatinamente en los laboratorios de todo el mundo. En los últimos años se ha constatado un apreciable aumento de las investigaciones en torno a los robots, lo que se traduce en un elevado número de publicaciones sobre muy diversos aspectos relacionados con ellos. Actualmente existen publicaciones periódicas internacionales exclusivamente enfocadas hacia la automatización en el laboratorio químico - *Laboratory Robotics and Automation*, *Journal of Automatic Chemistry* y *Advances in Laboratory Automation Robotics*, por citar las tres de mayor difusión -, así como conferencias internacionales que reúnen a los principales expertos mundiales en la materia - las *PittCon* y las *International Conference on Automation, Robotics and Artificial Intelligence applied to Analytical Chemistry*, estas últimas centradas en la aplicación de la tecnología al laboratorio. La Tabla 1 recoge una selección de 59 referencias de publicaciones aparecidas en los últimos cinco años, en las cuales se describen aplicaciones de las técnicas robotizadas en o para el laboratorio. Para todas ellas se han consignado una serie de aspectos de interés.

Así, se recoge la **instrumentación** empleada, especificando si es flexible o dedicada, esto es, reprogramable o no. Se constata que, en el 72 % de los casos, la instrumentación fue suministrada por la casa Zymark (Fig. 3a). De los equipos Zymark, prácticamente todos eran estaciones modulares programables (robot *Zymate*), dotadas de las características

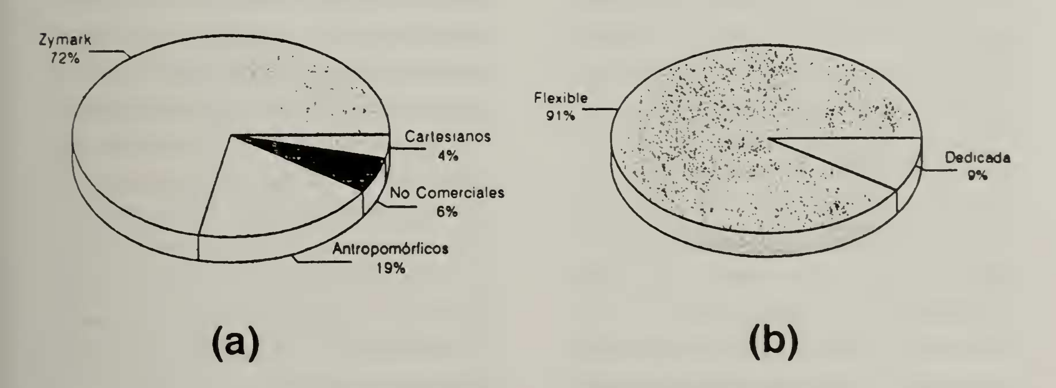


Figura 3. Diagramas de sectores donde se recogen los valores porcentuales, correspondientes a los datos consignados en la Tabla 1, referidos a la instrumentación: (a) instrumentación empleada y (b) tipo de automatización adoptada. Véanse detalles en el texto.

comentadas en la sección anterior. Los robots antropomórficos suponen el 19 % del total, mientras que los robots de geometría cartesiana sólo se emplearon en tres casos (39, 45, 70), al igual que los robots no comerciales (12, 43, 69).

En cuanto al tipo de automatización adoptada, ésta era flexible en el 91 % de los trabajos revisados, poniéndose claramente de manifiesto que los laboratorios apuestan por la versatilidad y el diseño modular ante una inversión de esta envergadura (Fig. 3b).

Por lo que respecta al tipo de **laboratorios**, destacan por el número de investigaciones publicadas los laboratorios farmacéuticos y clínicos, con un tercio aproximadamente del total (Fig. 4a). Debe hacerse notar en este punto que estos laboratorios se encuentran a la cabeza en lo que se refiere al grado de implantación de las técnicas automáticas en general y, en consecuencia, también en el ámbito de la Robótica. Asimismo, se comprueba que la investigación básica para la propuesta de nuevos métodos robotizados es bastante activa - el 34 % de las publicaciones proceden de laboratorios de investigación, tanto públicos como privados. El porcentaje de laboratorios medioambientales, en torno al 8.5 %, revela la escasa implantación de los robots en este contexto, atribuible, por un lado, a la ausencia de métodos oficiales robotizados y, por otro, a la naturaleza de las muestras medioambientales (aguas y aire, sobre todo), que hace posible su análisis mediante una instrumentación más simple y/o más específica. La participación de laboratorios alimentarios alcanza un 8.5 %, mientras que los laboratorios industriales totalizan alrededor de un 6.8 % (20, 30, 35, 43). Esta escasa utilización de las técnicas robotizadas puede justificarse, en ambos casos, por la gran complejidad de las muestras analizadas.

La gran variedad de **temáticas** resumidas en la Tabla 1 nos indica, para empezar, los numerosos campos de aplicación de los robots en el laboratorio químico. Destaca la gran cantidad de aplicaciones al análisis clínico y farmacológico (Fig. 4b), ámbitos donde la automatización y la Robótica se hallan, como se dijo con anterioridad, plenamente incorporadas. Dichas aplicaciones abarcan determinaciones de principios activos o sus metabolitos en plasma, suero u orina, así como el análisis de preparados farmacéuticos. Conviene reseñar, a este respecto, la extensa comercialización, desde hace más de dos décadas, de una amplia variedad de autoanalizadores totalmente automáticos para la determinación de los parámetros más frecuentes en Química Clínica. Se trata de una instrumentación muy sofisticada, rápida y con un alto grado de fiabilidad, que se inscribe en lo que se ha denominado automatización dedicada. Los robots no son, hoy por hoy, competitivos en relación con este tipo de instrumentación en el análisis de rutina,

y solamente son incorporados para el análisis de muestras sólidas y/o complejas, o cuando se quiere minimizar la intervención del operador.

El empleo de robots en el análisis de rutina es recomendable cuando se van a llevar a cabo tareas simples y repetitivas, y para abordar el pretratamiento de muestras que, dada su naturaleza o complejidad, sea imposible analizar mediante otras técnicas automáticas: alimentos, suelos, muestras industriales, productos naturales, materiales biológicos, etc. La limitación fundamental estriba en la complejidad de las operaciones previas para estos tipos de muestras; es frecuente que, tras la pesada, se precise de una o varias lixiviaciones, de extracciones líquido-sólido o líquido-líquido, de cambios de disolvente, auxiliados por filtraciones o centrifugaciones, todo ello antes de la determinación analítica propiamente dicha. Sólo la pesada es ya una operación cuya automatización representa grandes problemas (48), dada la gran variedad de posibles estados físicos de la muestra (semisólida, sólida en polvo, sólida en dosis o trozos, líquida más o menos viscosa, etc). Generalmente, cuanto mayor sea el número de operaciones previas involucradas en una determinación, menor es la fiabilidad del método automático en cuestión. Por consiguiente, las investigaciones en los campos del análisis alimentario, el análisis de suelos, el análisis industrial y el análisis medioambiental revisten un considerable interés, si bien la implantación generalizada de los robots para acometer análisis de rutina en los contextos citados se encuentra aún lejana.

La preparación de la muestra, casi siempre como fase previa a una determinación cromatográfica, es una temática de gran interés en que se centran algunas publicaciones revisadas; se trata de un ámbito en que la automatización ha incidido escasamente y que está en estrecha relación con los robots, cuyo empleo tiene, precisamente, la finalidad de automatizar las etapas previas del proceso analítico. La automatización en general también ocupa un lugar destacado entre las investigaciones publicadas. Un aspecto a tener en cuenta son los problemas que plantea la adaptación del personal al trabajo con los equipos automáticos, especialmente en lo que se refiere a las nuevas funciones que surgen dentro del laboratorio, por una parte, y a la necesidad de reciclaje en las nuevas tecnologías, por otra. En este sentido, conviene recordar uno de los peligros más graves de la automatización: la pérdida de la conexión entre el químico y el instrumento. Para que la automatización sea realmente eficaz, el operador humano debe situarse siempre en un nivel superior a la máquina, de forma que sepa continuamente qué está haciendo y no se convierta en un mero receptor de resultados.

En otro orden de cosas, merece ser destacada la importancia que tiene la

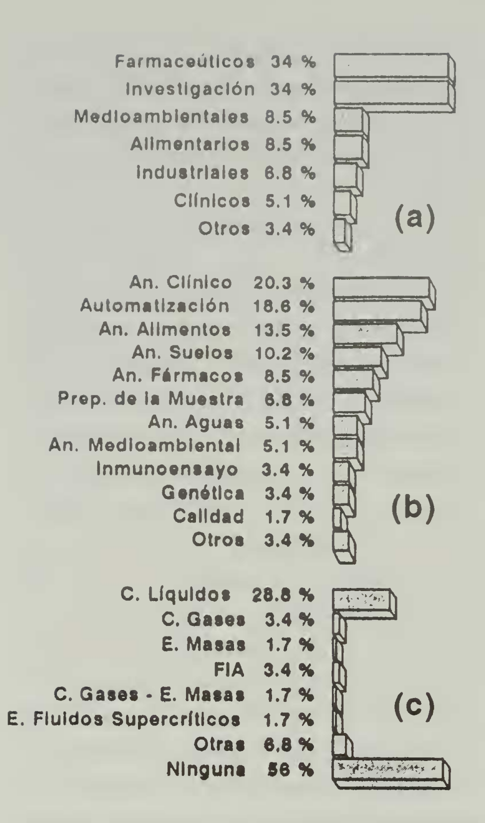


Figura 4. Diagramas de barras que muestran las distribuciones de (a) laboratorios, (b) temáticas y (c) técnicas acopladas, de las aplicaciones revisadas. Los porcentajes están calculados sobre los datos recogidos en la Tabla 1. Véanse detalles en el texto.

implantación de los robots en el laboratorio analítico desde el punto de vista de la mejora en la gestión y el control de la calidad (30). Se trata de un tema que cobra día a día una creciente importancia en nuestra sociedad, con la existencia de organismos especialmente dedicados a ello: la *International Organization for Standardization* (ISO) o, en España, la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Los citados organismos establecen normativas de obligado cumplimiento, que implican el desarrollo de un proceso organizado y sistemático de aseguramiento de la calidad (71). Por tanto, es indudable que en un laboratorio de control, en el cual es necesario el manejo de un gran volumen de información, tanto en lo que respecta a la recepción y al tratamiento de las muestras como al control de equipos y aparatos, se impone la automatización total como un punto clave en la planificación de la calidad, de manera que se libere al operario para la realización de labores más especializadas, a fin de lograr los objetivos de calidad (72).

Por último, en la Tabla 1 se consigna el empleo de otras técnicas, automáticas o no, acopladas con el robot. Muy frecuentemente, el robot realizaba las operaciones previas a una determinación cromatográfica (Fig. 4c); especialmente estudiado se halla el acoplamiento robot-CL, hasta el punto de que las casas comerciales suelen suministrar el módulo necesario para la inyección de la muestra ya tratada en un cromatógrafo de líquidos. Menos común es el acoplamiento con CG u otros tipos de técnicas cromatográficas (29, 45). El acoplamiento de un robot con un extractor de fluidos supercríticos (53) ofrece interesantes perspectivas para acometer la automatización total del análisis de muestras muy variadas. Cabe destacar el acoplamiento con la técnica de extracción asistida con microondas

(66), que proporciona una drástica reducción del tiempo total de análisis frente a la lixiviación convencional. También es digno de reseñarse el acoplamiento con técnicas de inyección en flujo (sistemas FIA y SIA), que se comentará en la siguiente sección.

EL FUTURO LABORATORIO ROBOTIZADO

La robotización se abre paso en los laboratorios como una de las alternativas automáticas más seguras y autónomas en su funcionamiento. En los últimos años se han producido mejoras sustanciales en los equipos; pero, al tratarse de una tecnología de reciente desarrollo, las innovaciones más espectaculares están aún por llegar.

El futuro laboratorio químico contará posiblemente con uno o varios robots, y estos robots tendrán unas características determinadas, que se resumen en una serie de tendencias, tanto para el *hardware* como para el *software*, que se irán enumerando y comentando seguidamente.

En primer lugar, podemos destacar la fuerte tendencia a la **miniaturización** de los equipos, tendencia que es común en lo que a la automatización se refiere, y que va dirigida a la economía tanto de espacio como de dinero. En efecto, la miniaturización supone un menor consumo de materiales y reactivos, que redunda en un menor coste global de la determinación. En el contexto de la Robótica, la miniaturización lleva aparejada la pérdida de flexibilidad, por lo cual también podemos señalar una tendencia paralela al desarrollo y empleo de la **instrumentación dedicada**, más simple, barata y fácil de manejar. La Microrrobótica se perfila, pues, como un campo emergente, en el que se han descrito ya algunas aplicaciones interesantes (73).

La productividad, por otra parte, se va a convertir en una exigencia de primer orden, tan importante como la calidad de los resultados. Ello implica una clara tendencia a liberar al personal especializado del laboratorio de aquellas tareas rutinarias y no especializadas que se realizan de forma frecuente, como es el transporte de muestras y materiales dentro del laboratorio. Se prevé la futura implantación de robots móviles, destinados a cubrir dichas tareas, con el consiguiente aumento del tiempo útil para la realización de labores especializadas por parte de los operadores (74).

La tendencia más importante para el *hardware*, que supondrá un salto cualitativo, será, sin duda, la **incorporación de sensores**, que posibilitará que el robot "reconozca" su entorno y asegurará un aspecto clave para la automatización: la trazabilidad de los resultados. Se han desarrollado hasta la fecha sensores ópticos (cámaras), táctiles, térmicos, etc, que pueden concebirse para ser usados separadamente o para su implementación en estaciones o equipos robotizados (75). También se han ensayado lectores ópticos para el empleo de códigos de barras

identificativos para cada muestra, basados en una simbología bidimensional, que suple las limitaciones de la simbología lineal empleada usualmente (76).

En lo que se refiere al *software*, podemos destacar, primeramente, la tendencia hacia la mejora de las **interfases robot-usuario**, encaminada a facilitar la comunicación entre ambos, con la puesta a punto de programas abiertos e interactivos (77) que no requieran unos conocimientos profundos de Informática, y a un control más efectivo de la estación robotizada (78). También se tiende a la implementación de algoritmos para la programación temporal (*scheduling*), consistente en la optimización del tiempo de operación mediante el manejo simultáneo de muestras en distintos estadios de análisis (5,8). Este *modus operandi* se contrapone al modo de operación secuencial, propio de un operador humano, y su incorporación supone una reducción, a veces muy notable, del tiempo de análisis.

Precisamente la optimización de una cierta metodología es la fase de la puesta a punto que más riesgos para el personal y para la instrumentación conlleva. Con el fin de evitar estos riesgos, se tiende cada vez más a la utilización de **programas de simulación** (79), mediante los cuales se estudian las distintas posibilidades de forma rigurosa y sin necesidad de llevarlas a la práctica en el laboratorio. Estos programas son de gran complejidad, y su implantación tropieza con el obstáculo de que han de hacerse inteligibles al usuario.

Sin embargo, la auténtica revolución provendrá del campo de la **inteligencia artificial**. Frente a las actuales estaciones robotizadas, dotadas de unos rudimentarios elementos para la toma de decisiones en muy contados momentos, los robots del futuro incorporarán sistemas expertos, de manera que podrán encontrar la solución a problemas que vayan surgiendo sin el concurso del operador, valiéndose sólo de una información básica inicial y de la información que hayan ido obteniendo durante el proceso. Los sistemas expertos se encuentran actualmente en las primeras fases de su desarrollo, y es precisamente la "asimilación" de nueva información para ser incorporada a los algoritmos que posee el sistema, lo que podríamos denominar "aprendizaje", el aspecto que más dificultades plantea (80). Si bien hasta la fecha se han descrito sólo sistemas expertos de forma aislada, se prevé que en el futuro irán implementados en los equipos de laboratorio, por lo que podemos hablar de "instrumentación inteligente", con lo que ello supone para el aprovechamiento integral de todas las posibilidades. La instalación de redes en el laboratorio creará un entorno en el que se integrarán los citados instrumentos, actuando como clientes y suministradores (81).

Por último, comentaremos dos tendencias de gran importancia relativas al desarrollo futuro de métodos

robotizados. La primera es el **acoplamiento con otras técnicas automáticas**, tanto continuas (82) como discontinuas (83), con el objetivo de reducir los costes y de aprovechar las ventajas de cada técnica obviando sus inconvenientes. Concretamente, la utilidad del acoplamiento estación robotizada- sistema FI se ha puesto de manifiesto (50) para la reducción del tiempo de análisis, por un lado, y del coste, por otro. En segundo lugar, existe una tendencia a la puesta a punto de métodos robotizados no basados en métodos manuales. Hasta el momento, la automatización ha consistido esencialmente en la adaptación de una metodología manual ya contrastada para ser realizada con una instrumentación automática, reduciendo al mínimo la intervención del operador. En el futuro, se desarrollarán métodos automáticos independientes y concebidos para la robotización desde un principio (11).

REFERENCIAS

(1) K. Capek. *R.U.R.* Ed. Mensajero, S. A., 1991

(2) *Enciclopedia LAROUSSE*. Ed. Planeta, 1985

(3) H. Katzan. *Productividad y Robótica*. Ed. Deusto, Bilbao, 1991.

(4) M. Valcárcel y M. D. Luque de Castro. *Automatic Methods of Analysis*. Elsevier. Amsterdam, 1988

(5) W. J. Hurst y J. Mortimer. *Laboratory Robotics: A Guide to Planning, Programming and Applications*. VCH Publishers. New York, 1987

(6) H. M. Kingston y M. L. Kingston. *Lab. Rob. Autom.* **7**, 1995, 3-22

(7) M.D. Luque de Castro y P. Torres. *Trends in Anal. Chem.*, **14**(**10**), 1995, 492-496.

8) *Laboratory Robotics Handbook*. Zymark Corp. Hopkinton, MA, 1988

(9) M. Valcárcel y M. D. Luque de Castro. *Automatic Methods of Analysis*. Ed. Elsevier, Amsterdam, 1988

(10) *Analytical Consumer*,Dic. 1993, 2-4

(11) M. Crook. *Anal. Proc.* **30**, 1993, 165-167

(12) L. A. Gifford, C. Wright y J. Gilbert. *Food Addit. Contam.* **7**(**6**), 1990, 829-836

(13) M. Sasaki y K. Ogura. *Clin. Chem.* **36**(9), 1990, 1567-1571 .

(14) C. N. C. Meredith y T. J. White. *Anal. Proc.* **27**, 1990, 182-184

(15) J. Hempenius, J. Wieling, J. H. G. Jonkman, O. E. De-Noord, P. M. J. Coenegracht y D. A. Doornbos. *J. Pharm. Biomed. Anal.* **8**(**4**), 1990, 313-320

(16) A. Chauchereau, D. Astinotti y M. M. Bouton. *Anal. Biochem* **188**(**2**), 1990, 310-316

(17) L. Pietta. *Adv. Lab. Autom. Rob.* **Vol. 7**, 1991, 303-313

(18) W. Koskinen, L. J. Jarvis, R. H. Dowdy, D. L. Wise y D. D. Buhler. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **55**, 1991, 561-562

(19) R. W. Taylor y S. D. Le. *J. Anal. Toxicol.* **15**, 1991, 276-278

(20) W. A. Michalik, R. M. Zerkal y J. B. Maynard. *Adv. Lab. Autom. Rob.* **Vol. 7**, 1991, 325-339

(21) J. E. Coutant, P. A. Westmark, P. A. Nardella, S. M. Walter y P. A. Okerholm. *J. Chromatogr. Biomed. Appl.* **108**, 1991, 139-148

(22) J. E. Franc, G. F. Duncan, R. H. Farmen y K. A. Pittman. *J. Chromatogr. Biomed. Appl.* **108**, 1991, 129-138

(23) W. Anderson. *Adv. Lab. Autom. Rob.* **Vol. 7**, 1991, 351- 363

(24) L. A. Brunner y R. C. Luders. *J. Chromatogr. Sci.* **29**(**7**), 1991, 287-291

(25) F. H. Zenie. *Fresenius. J. Anal. Chem.* **339**(**11**), 1991, 797-799

(26) E. A. Elnenaey, J. Pluscec y V. Fernández. *J. Autom. Chem.* **13**(**1**), 1991, 17-21

(27) C. Wright. *Chromatogr. Anal.* **17**, 1991, 9-11

(28) L. W. Linquist y F. X. Dias. *Adv. Lab. Autom. Rob.* **Vol. 7**, 1991, 341-350

(29) A. Bruns, H. Waldhoff, A. Wilsch-Ingang y W. Winkle. *J. Chromatogr.* **592**, 1992, 249-253

(30) J. M. Andrade, D. Prada, S. Muniategui, B. Gómez y M. Pan. *Quím. Anal.* **11**, 1992, 253-269

(31) E. I. Minder, B. Suter y D. J. Vanderschmidt. *Chemom. Intell. Lab. Syst*

17(1), 1992, 119-122
(32) M. C. Loveridge y G. J. Woodland. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 17(1), 1992, 123-127
(33) E. C. Van der Voorden, E. Gout, O. L. T. Van Hulten y D. E. M. M. Vendrig. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 17(1), 1992, 129-135
(34) H. Agemian, J. S. Ford y N. K. Madsen. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 17(1), 1992, 145-152
(35) A. Millier y G. Vallet. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 17(1), 1992, 153-157
(36) T. L. Lloyd, T. B. Perschy, A. E. Gooding y J. J. Tomlinson. *Biomed. Chromatogr.* 6(6), 1992, 311-316
(37) E. Tagliaferri. *1st International Symposium on Automation, Robotics and Artificial Intelligence applied to Analytical Chemistry.* Montreux, 1992
(38) F. P. Gork. *1st International Symposium on Automation, Robotics and Artificial Intelligence applied to Analytical Chemistry.* Montreux, 1992
(39) R. A. Turner y R. A. Felder. *1st International Symposium on Automation, Robotics and Artificial Intelligence applied to Analytical Chemistry.* Montreux, 1992
(40) G. Plummer. *1st International Symposium on Automation, Robotics and Artificial Intelligence applied to Analytical Chemistry.* Montreux, 1992
(41) M. Guzmán y B. J. Compton. *Talanta* 40, 1993, 1943-1950
(42) M. J. Lee, A. J. Organ y J. L. Sims. *Lab. Rob. Autom.* 5, 1993, 149-153
(43) S. Jones. *Lab. Equip. Dig.* 31(3), 1993, 31
(44) D. S. France, M. K. Murdoch, M. Russell, N. Surve, X. Ma, M. Drelich, C. Duston, A. Hanson, J. R. Paterniti y D. B. Weinstein. *Lab. Rob. Autom.* 5, 1993, 201-205
(45) C. D. Herold, K. Andree, D. A. Herold y R. A. Felder. *Clin. Chem.* 39(1), 1993, 143-147
(46) E. Park. *Lab. Rob. Autom.* 5, 1993, 97-101
(47) O. T. Aloba, D. E. Bergman, R. T. Miller y R. E. Daly. *J. Pharm. Biomed. Anal.* 11(10), 1993, 861-869
(48) P. Torres, J. A. García Mesa, M. D. Luque de Castro y M. Valcárcel. *Fresenius J. Anal. Chem.* 346, 1993,704-706
(49) J. A. García Mesa, M. D. Luque de Castro y M. Valcárcel. *Talanta* 40(11), 1993, 1595-1600
(50) J. A. García Mesa, M. D. Luque de Castro y M. Valcárcel. *Anal. Chem.* 65(23), 1993, 3540-3542
(51) J. C. Lynch, J. S. Green, P. K. Hovsepian, K. L. Reilly y J. A. Short. *Journal Autom. Chem.* 16, 1994, 131-133
(52) W. F. Berry y V. Giarroco. *Journal Autom. Chem.* 16, 1994, 205-209
(53) L. J. Jarvis, W. C. Koskinen y R. H. Dowdy. *Lab. Rob. Autom.* 6, 1994, 167-170
(54) R. A. Fisco, J. W. Sulner, D. Silowka, J. A. Troskosky, J. P. Zodda y M. N. Eakins. *Lab. Rob. Autom.* 6, 1994, 159-165
(55) J. Y. K. Hsieh, C. Lin, B. K. Matuszewski y M. R. Dobrinska. *Journal Pharm. Biom. Anal.* 12, 1994, 1555-1562
(56) S. Conder. *J. Autom. Chem.* 16, 1994, 117-119
(57) N. E. Fraley. *J. Autom. Chem.* 16, 1994, 139-141
(58) J. N. Little, A. Proulx y J. Connelly. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 26(2), 1994, 89-99
(59) J. Lamm, A. Sawhney y L. A. Smith. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 26(2), 1994, 79-87
(60) J. Y. K. Hsieh, C. Lin, y B. K. Matuszewski. *J. Chromatogr. B. Biomed. Appl.* 661(2), 1994, 307-312
(61) P. Torres, J. A. García Mesa, M. D. Luque de Castro y M. Valcárcel. *Lab. Rob. Autom.* 6, 1994, 229-232
(62) P. Torres, J. A. García Mesa, M. D. Luque de Castro y M. Valcárcel. *Lab. Rob. Autom.* 6, 1994, 233- 237
(63) J. Hempenius, G. Hendriks, J. Hingstman, C. K. Mensink, J. H. G. Jonkman y C. C. Lin. *J. Pharm. Biomed. Anal.* 12(11), 1994, 1443-1451
(64) P. Torres, J. A. García Mesa, M. D. Luque de Castro y M. Valcárcel. *J. Autom. Chem.* 16(5), 1994, 183-186
(65) R. C. Messaros y S. Scypinski. *Lab. Rob. Autom.* 7, 1995, 35-40
(66) P. Torres, E. Ballesteros y M. D. Luque de Castro. *Anal. Chim. Acta.* 308, 1995, 371-377.
(67) J. Babiak, B. Lucotch, A. Russo, L. Heydt, S. Williams y R. McCaully. *J. Autom. Chem.* 17(2), 1995, 55-58.
(68) F. H. Zenie. *J. Autom. Chem.* 17(2), 1995, 41-45.
(69) P. A. Medwick, J. T. Chen, B. K. Den Hartog y F. S. Smutniak. *Lab. Rob. Autom.* 7, 1995, 81-84.
(70) C. Shumate, E. Mardis, L. Weinstock y D. Bruce. *Lab. Rob. Autom.* 7, 1995, 73-80.

(71) J. M. Juran y F. M. Gryna. *Juran's Quality Control Handbook*. 4ª Edición. Ed. McGraw-Hill, 1988.
(72) M. Valcárcel y A. Ríos. *La Calidad en los Laboratorios Analíticos*. Ed. Reverté, 1992.
(73) C. W. Burkhardt, D. Glauser y P. Flury. *4th International Conference on Automation, Robotics and Artificial Intelligence applied to Analytical Chemistry and Laboratory Medicine*. Montreux, 1995
(74) C. Stey, D. Nagy, J. Onaghise, D. Herold y R. Felder. *Ibid.*
(75) M. Valcárcel y A. Ríos. *Analyst*, en prensa
(76) J. Agapakis. *4th International Conference on Automation, Robotics and Artificial Intelligence applied to Analytical Chemistry and Laboratory Medicine*. Montreux, 1995
(77) R. Buhlinan, J. Carmona, A. Donzel, N. Donzel y J. Gil. *J. Chromatogr. Sci.* **32(6)**, 1994, 243
(78) D. Donzel. *4th International Conference on Automation, Robotics and Artificial Intelligence applied to Analytical Chemistry and Laboratory Medicine*. Montreux, 1995
(79) R. Schäfer, C. Schulz, M. Laab y O. Stückert. *4th International Conference on Automation, Robotics and Artificial Intelligence applied to Analytical Chemistry and Laboratory Medicine*. Montreux, 1995
(80) F. X. Rius. *Anal. Chim. Acta* **283**, 1993, 518-522.
(81) J. N. Little. *4th International Conference on Automation, Robotics and Artificial Intelligence applied to Analytical Chemistry and Laboratory Medicine*. Montreux, 1995
(82) G. Collins. *Anal. Europa* **21**, 1995
(83) P. Herrig. *4th International Conference on Automation, Robotics and Artificial Intelligence applied to Analytical Chemistry and Laboratory Medicine*. Montreux, 1995

Tabla 1. *Resumen de referencias correspondientes a los años 1990-1995, relacionadas con aplicaciones de las tecnologías robotizadas en el ámbito del laboratorio químico.*

Referencia	Instrumentación	Tipo	Laboratorio	Temática	Técnicas acopladas
(12)	R. Antropomórfico	Flexible	Alimentario	Anál. Alimentos	CL
(13)	Seiko	Flexible	Clínico	Anál. Clínico	---
(14)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Toxicológico	CL
(15)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Clínico	CL
(16)	Beckman	Dedicada	Investigación	Anál. Clínico	---
(17)	Zymark	Flexible	Alimentario	Anál. Alimentos	CL
(18)	Zymark	Flexible	Medioambiental	Anál. Suelos	CG
(19)	Zymark	Flexible	Policial	Anál. Drogas	CG-EM
(20)	Zymark	Flexible	Industrial	Anál. Aguas	---
(21)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Clínico	CL
(22)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Clínico	CL
(23)	Zymark	Flexible	Medioambiental	Anál. Aguas	---
(24)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Clínico	CL
(25)	Genérica	Genérica	Investigación	Automatización	---
(26)	Genárica	Genérica	Farmacéutico	Automatización	---
(27)	Varios	---	Alimentario	Anál. Alimentos	---
(28)	Zymark	Flexible	Medioambiental	An. Medioambiental	---
(29)	Zymark	Flexible	Investigación	Prep. de muestras	CL-CET
(30)	Genérica	Genérica	Industrial	Asegur. Calidad	---
(31)	Zymark	Flexible	Clínico	Anál. Clínico	CL
(32)	Mitsubishi	Flexible	Farmacéutico	Anál. Fármacos	---

Tabla 1. *Continuación.*

Referencia	Instrumentación	Tipo	Laboratorio	Temática	Técnicas acopladas
(33)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Fármacos	CL
(34)	CRS	Flexible	Medioambiental	An. Mediambiental	---
(35)	Hewlett-Packard	Flexible	Industrial	Anál. Aguas	CG
(36)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Clínico	CL
(37)	Hewlett-Packard	Flexible	Alimentario	Anál. Alimentos	CL
(38)	Zymark	Flexible	Alimentario	Anál. Alimentos	---
(39)	Hamilton	Flexible	Investigación	Automatización	---
(40)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Fármacos	---
(41)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Clínico	SIA
(42)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Automatización	EM
(43)	R. antropomórfico	Flexible	Industrial	Automatización	---
(44)	Zymark	Flexible	Investigación	Automatización	---
(45)	Hamilton	Flexible	Clínico	Anál. Clínico	CA
(46)	Hewlett-Packard	Flexible	Investigación	Automatización	---
(47)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Prep. de muestras	CL
(48)	Zymark	Flexible	Investigación	Anál. Suelos	---
(49)	Zymark	Flexible	Investigación	Anál. Alimentos	---
(50)	Zymark	Flexible	Investigación	Anál. Alimentos	FIA
(51)	Zymark	Flex. & Ded.	Farmacéutico	Automatización	---
(52)	Hewlett-Packard	Flexible	Investigación	Prep. de muestras	---
(53)	Zymark	Flexible	Medioambiental	An. Medioambiental	EFS

Tabla 1. *Continuación.*

Referencia	Instrumentación	Tipo	Laboratorio	Temática	Técnicas acopladas
(54)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Fármacos	CL
(55)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Clínico	CL-UV
(56)	Zymark / SFA	Flex./Ded.	Farmacéutico	Automatización	---
(57)	Zymark	Flexible	Anál. Químico	Anál. Alimentos	---
(58)	Genérica	Genérico	Investigación	Inmunoensayo	---
(59)	Tecan	Flexible	Investigación	Inmunoensayo	---
(60)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Prep. de muestras	CL
(61)	Zymark	Flexible	Investigación	Anál. Suelos	---
(62)	Zymark	Flexible	Investigación	Anál. Suelos	---
(63)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Clínico	CL
(64)	Zymark	Flexible	Investigación	Anál. Fármacos	---
(65)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Suelos	---
(66)	Zymark	Flexible	Investigación	Anál. Suelos	Ex. Mic./FIA
(67)	Genérica	Genérico	Investigación	Automatización	---
(68)	Zymark	Gemnérico	Investigación	Automatización	---
(69)	No comercial	Dedicado	Investigación	Genética	---
(70)	Hamilton	Dedicado	Investigación	Genética	---

CL - Cromatografía de líquidos; CG - Cromatografía de Gases; EM - Espectrometría de Masas; CET - Cromatografía de Exclusión por Tamaños; SIA - Análisis por Inyección Secuencial; CA - Cromatografía de Afinidad; FIA - Análisis por Inyección en Flujo; EFS - Extracción con Fluidos Supercríticos; Ex. Mic. - Extracción Asistida con Microondas.

Tabla 1. *Continuación.*

Referencia	Instrumentación	Tipo	Laboratorio	Temática	Técnicas acopladas
(54)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Fármacos	CL
(55)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Clínico	CL-UV
(56)	Zymark / SFA	Flex./Ded.	Farmacéutico	Automatización	---
(57)	Zymark	Flexible	Anál. Químico	Anál. Alimentos	---
(58)	Genérica	Genérico	Investigación	Inmunoensayo	---
(59)	Tecan	Flexible	Investigación	Inmunoensayo	---
(60)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Prep. de muestras	CL
(61)	Zymark	Flexible	Investigación	Anál. Suelos	---
(62)	Zymark	Flexible	Investigación	Anál. Suelos	---
(63)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Clínico	CL
(64)	Zymark	Flexible	Investigación	Anál. Fármacos	---
(65)	Zymark	Flexible	Farmacéutico	Anál. Suelos	---
(66)	Zymark	Flexible	Investigación	Anál. Suelos	Ex. Mic./FIA
(67)	Genérica	Genérico	Investigación	Automatización	---
(68)	Zymark	Gemnérico	Investigación	Automatización	---
(69)	No comercial	Dedicado	Investigación	Genética	---
(70)	Hamilton	Dedicado	Investigación	Genética	---

CL - Cromatografía de líquidos; CG - Cromatografía de Gases; EM - Espectrometría de Masas; CET - Cromatografía de Exclusión por Tamaños; SIA - Análisis por Inyección Secuencial; CA - Cromatografía de Afinidad; FIA - Análisis por Inyección en Flujo; EFS - Extracción con Fluidos Supercríticos; Ex. Mic. - Extracción Asistida con Microondas.